IL VELIVOLO A REAZIONE "CAMPINI-CAPRONI,,. SULLA PRUA CHE PER LA MANCANZA DI ELICA HA UNA FORMA INCONSUETA È LA BOCCA DI ENTRATA DELL'ARIA

AEROTECNICA

Lo sviluppo del motore a reazione od a razzo

Riportiamo dalla Rivista *Flugwehr und–Technik* n. 7 e 8, del 1941, un articolo del dott. Josef Stemmer sul problema attuale del motore a reazione od a razzo.

1. *Sviluppo storico.* – La storia del razzo è molto antica, e si può seguire sino a tempi molto lontani. Ha servito per scopi pacifici, ma principalmente come mezzo bellico. Nella guerra dei trent'anni ha avuto molta importanza alla presa di Philippsburg nel 1645. Ai tempi di Napoleone il generale Cóngreve ottenne la caduta di Boulogne (1806) e di Kopenhagen (1807) mediante artiglierie a razzo; su Kopenhagen vennero lanciati, per esempio, 120.000 razzi. Questa specialità nel secolo scorso sostituiva quindi l'artiglieria. La sua potenza, nel XVIII e XIX secolo, risulta dallo specchietto:

Razzi di guerra di Cóngreve: calibro cm. 5, 8, 12; peso, libbre 12, 24, 32, 48; gittata, metri 2000, 2500, 2800.

Vennero impiegati specialmente i proiettili da 32 libbre, e servivano per il trasporto di una carica esplosiva di 8–10 e 20 libbre. Con razzi migliorati queste cariche, negli anni 1820–1840, vennero lanciate a m. 1840, 2000 e 3500. Coi progressi dei cannoni nel XIX secolo, i razzi come arma di guerra perdettero sempre più importanza. Invece se ne iniziò lo sviluppo per scopi scientifici, per segnalazioni, salvataggi di navi, lotta contro la grandine, e per prese fotografiche.

Il razzo di salvataggio in mare (*fig. 1*) serve per lanciare, da terra o da una altra nave, una lunga fune alla nave in pericolo, o viceversa; mediante la fune viene poi teso un forte cavo lungo il quale può scorrere un cesto per il trasporto di persone o merci preziose. Da citare anche il razzo per lo scioglimento della
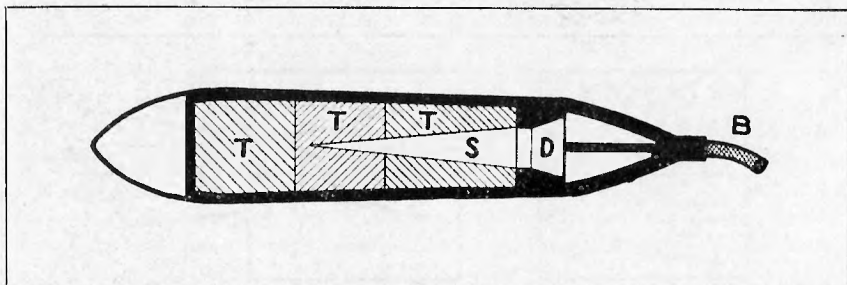
FIG. 1 – RAZZO DI SALVATAGGIO PER NAVI

B) fune; *T*) elementi per la propulsione; *S*) foro nell'anima di polvere; *D*) ugello.
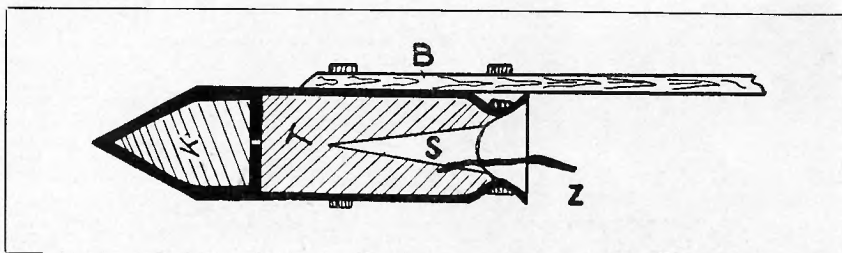
FIG. 2 – RAZZO ANTIGRANDINE
K) percussore; *T*) elemento di carica per la propulsione; *Z*) miccia; *S*) anima; *B*) asta di stabilizzazione.

grandine, che viene ancor oggi impiegato in Svizzera (*fig. 2*). Ebbe un grande sviluppo in seguito ai tiri per cattivo tempo, con un cannone speciale; i migliori successi furono ottenuti a Emmishofen, dal pirotecnico svizzero Müller, che riuscì a fare innalzare i razzi sino a 1200 metri; tali razzi vengono usati ancora attualmente ed hanno lo scopo seguente: lanciando un razzo in una zona dove si inizia la caduta della grandine, la corrente d'aria che si forma dopo l'esplosione provoca la trasformazione dei chicchi di grandine in fiocchi di neve i quali a sua volta si sciolgono in pioggia dopo la seconda o terza esplosione. L'azione di un razzo si estende all'incirca su una zona di 1 chilometro quadrato; se ne usano di calibro di 3-4 centimetri, con lunghezza di 25-35 centimetri. La carica, polvere nera, è contenuta in una guaina di cartone.

Il problema della reazione fu ripreso negli anni 1919 e 1921. L'americano prof. Goddard del Clark College di Worcester pubblicò in quei tempi un libro in cui per la prima volta la questione veniva trattata scientificamente, e si iniziava una nuova scienza. Secondo notizie certamente esagerate, i razzi di Goddard avrebbero raggiunto i 120 chilometri di altezza; ma in seguito non se ne parlò più.

2. *La legge di moto del razzo.* – Apparato a razzo od a reazione può esser indicato qualsiasi apparato in cui un gas od un liquido si sprigionino sotto pressione ed a grande velocità da un orificio, originando in tal modo una forza di reazione o controspinta. Il fenomeno può esser rappresentato come segue:

In un cilindro chiuso da ogni parte si abbia un gas sotto pressione (*fig. 3*); le sue molecole sono invisibili ad occhio nudo e si suppongono sferiche. Fra di esse si ha una tensione o pressione, che viene rappresentata con una molla a
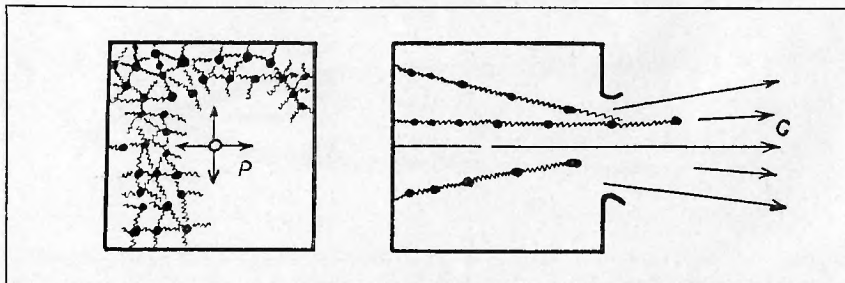
FIG. 3 – EFFETTO DELLA PRESSIONE IN UN RECIPIENTE
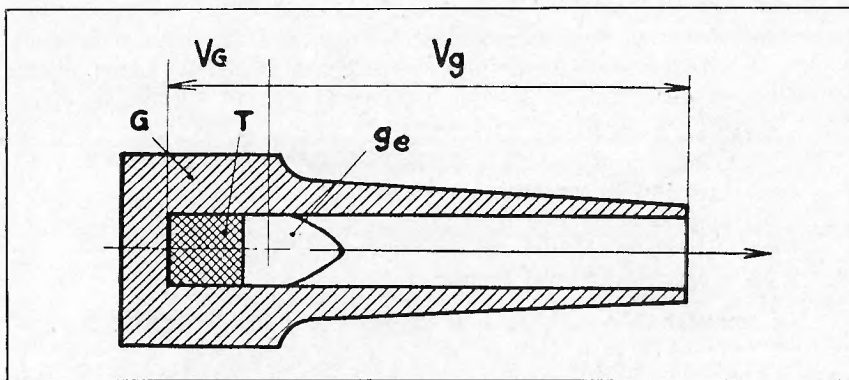
FIG. 4 – TIRO DALLA CANNA DI UN CANNONE

spirale. In relazione ad un gran numero di molecole si avrà nel cilindro un numero ancora maggiore di molle a spirale, ed il cilindro conterrà perciò grandi energie che agiranno uniformemente sulle pareti. Queste forze agiscono, logicamente, anche quando non vi sia aria attorno al cilindro. Sinchè questo rimane chiuso, si ha uno stato di riposo. Se però si toglie una parete del cilindro, le singole particelle di gas sfuggono a grande velocità, in seguito allo sforzo della pressione. Entra in funzione la legge fondamentale fisica dell'*actio et reactio*. È cioè ciascuna azione ha una controazione della stessa grandezza ma diretta in senso inverso. Questa legge vale anche per il vuoto, ciò che significa praticamente che si può volare con un apparecchio a reazione ad altezze illimitate, nella stratosfera od anche nello spazio planetario, poichè il gas sgorga dall'apertura del cilindro, anche se non vi sia aria circostante. Le molecole di gas non urtano contro i bordi, ma la reazione sorge dal fatto che ciascuna forza elementare (molla) si esplica tra le molecole, verso l'apertura del cilindro. Questa espansione si propaga naturalmente sino alla parete posteriore, di dove viene rimandata. In realtà l'effetto di reazione si mostra già nell'ugello, in quanto ne venga applicato uno all'uscita del cilindro.

Queste considerazioni valgono anche per il razzo a polvere. Anche questo ha il suo effetto nel vuoto. Si riscontra spesso l'opinione che per una combustione, com'è necessario nel caso del razzo, sia indispensabile l'ossigeno o l'aria. Ciò non è vero, poichè la polvere è un composto di zolfo, carbone e salnitro; quest'ultimo contiene ossigeno e rende quindi possibile la combustione anche nel vuoto. Per gli apparati a reazione a liquido (combustibili liquidi che vengono gassificati), e che descriveremo in seguito, deve essere portato anche l'ossigeno, onde formare una miscela che possa accendersi.

L'azione del razzo si fonda perciò sul principio di reazione, che è un caso speciale della legge sulla permanenza del centro di gravità, a sua volta riferibile alla terza legge fondamentale di Newton. Questa stabilisce che ad ogni forza se ne contrappone una egualmente grande e di senso contrario. È necessaria una forza per spingere i gas fuori del cilindro o dell'astuccio del razzo, ma a questa si contrappone una forza di uguale grandezza sul cilindro. Questo effetto di reazione si può chiaramente rappresentare su una bocca da fuoco (*fig. 4*). Dall'equazione di moto di Newton si può derivare la legge dell'impulso,

applicabile a tutti i fenomeni di reazione. Se la carica di polvere che si trova nella canna dell'arma viene ad esplodere, la pressione si trasmette ugualmente da ogni lato. La pressione dei gas fa uscire il proiettile g_e dalla canna. Siano i simboli:

M_G = massa dell'arma,
V_G = velocità di rinculo dell'arma,
m_{ge} = massa del proiettile,
v_{ge} = velocità del proiettile
b_{Ge} = accelerazione dell'arma,
b_{ge} = accelerazione del proiettile.

Nel momento dell'esplosione la stessa forza K agisce sulle due masse.

$$K_G = M_G \cdot b_G \qquad K_g = m_{ge} \cdot b_{ge}$$

e quindi

$$M_G \cdot b_G = m_{ge} \cdot b_{ge}$$

da cui risulta

$$\frac{b_{ge}}{b_G} = \frac{M_G}{m_{ge}}$$

Le velocità finali dell'arma e del proiettile forniscono il rapporto delle accelerazioni

$$\frac{V_G}{v_{ge}} = \frac{b_G}{b_{ge}}$$

e quindi

$$M_G \cdot V_G = m_{ge} \cdot v_{ge}$$

Questa espressione rappresenta la legge dell'impulso, che ha fondamentale importanza per la teoria della reazione, poichè esprime chiaramente l'effetto della reazione.

Si consideri nuovamente il cilindro di gas applicandovi la legge dell'impulso, rappresentando però il cilindro come una grossa sfera ed il gas uscente come una piccola sfera (*fig.* 5). Se si introduce un forte rapporto di masse M/m, la piccola sfera può assumere una qualsiasi velocità. Per rendere più chiara la cosa si esamina più partitamente, in linea matematica, la ripartizione di massa.
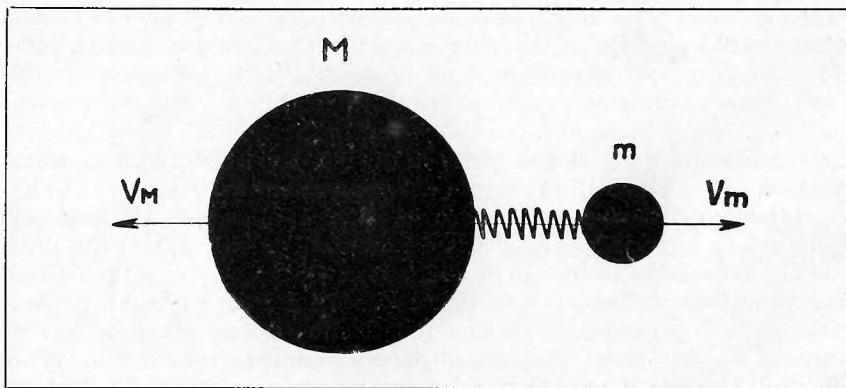
FIG. 5 – LANCIO DI MASSE
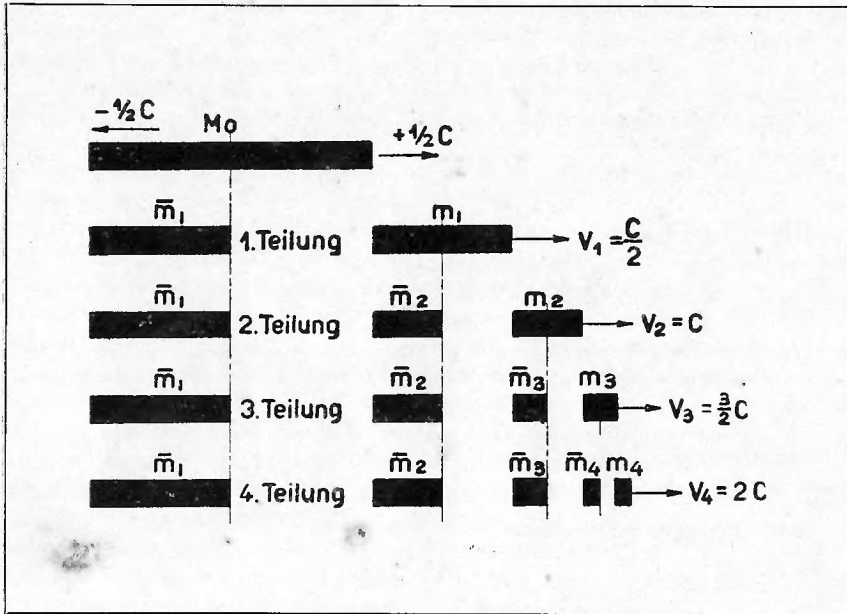
FIG. 6 – SUDDIVISIONE DI MASSE

Si consideri un corpo in uno spazio vuoto e non soggetto alla gravità (*fig.* 6) che viene diviso in due parti uguali da un carico esplosivo. Le due parti si allontanano una dall'altra colla velocità di esplosione c. La velocità dell'elemento singolo rispetto al centro di gravità comune sarà: $v_1 = \frac{c}{2}$. Il corpo può essere considerato come un razzo, in una metà del quale si trovi la cabina dei passeggeri. Da questa metà venga staccato un elemento $1/n$, che riceve la velocità supplementare $(1/n)\ c$. La velocità complessiva è

$$v_2 = \frac{2}{n} \cdot c;$$

dopo il distacco della parte k la velocità diventa

$$v_k = \frac{k}{n} \cdot c.$$

Nella *fig.* 6 è stata volta per volta lanciata la metà della massa residua. La velocità iniziale sia v_0; allora la velocità raggiungibili dopo, per esempio, quattro suddivisioni, risultano come segue:

1ª suddivisione

$$v_1 = v_0 + \frac{c}{2}$$

2ª suddivisione

$$v_2 = v_0 + \frac{c}{2} + \frac{c}{2} = v_0 + c$$

3ª suddivisione

$$v_3 = v_0 + \frac{c}{2} + \frac{c}{2} + \frac{c}{2} = v_0 + \frac{3}{2} \cdot c$$

4ª suddivisione

$$v_4 = v_0 + \frac{c}{2} + \frac{c}{2} + \frac{c}{2} + \frac{c}{2} = v_0 + 2c.$$

Dopo, per esempio, n suddivisioni, si ha in generale

$$v_n = v_0 + \frac{n}{2} \cdot c.$$

Da questa constatazione risulta nuovamente che la particella che diviene sempre più piccola (dopo n suddivisioni) può assumere una velocità finale a piacere.

Si presenta ora la domanda sulla massa che rimane volta per volta. Quanto a lungo si può praticamente eseguire una suddivisione? La diminuzione della massa avviene secondo la legge seguente:

Dopo la prima suddivisione

$$M_1 = \frac{1}{2} \cdot M_0$$

Dopo la seconda suddivisione

$$M_2 = \frac{1}{2} \cdot M_0 = \frac{1}{4} \cdot M_0$$

Dopo la terza suddivisione

$$M_3 = \frac{1}{8} \cdot M_0$$

Dopo la quarta suddivisione

$$M_4 = \frac{1}{16} \cdot M_0$$

Dopo la ennesima suddivisione si avrà in generale

$$M_n = \frac{1}{2^n} \cdot M_0$$

Se per esempio si vuole una velocità superterrestre di 11,2 km/sec. (che sarebbe necessaria per vincere la gravità terrestre) si tratterebbe forse di una suddivisione ripetuta cento volte (la cifra 100 è scelta a caso). Cosa rimane però come massa residua, nella quale si trova la cabina?

$$M_{100} = \frac{1}{2^{100}} \cdot M_0$$

2^{100} = un quintilione e 269 quattrilioni, numero di cui non ci si può fare una idea. Se per esempio la massa iniziale fosse stata grande come la terra, dopo l'ultima suddivisione non rimarrebbe che un duemillesimo di grammo. Il problema del volo a razzo per grandissime velocità, come sarebbero per esempio

necessarie per poter abbandonare la terra, appare quindi insolubile, in base a questo ragionamento. Si può però giungere alla mèta, come dimostrano le considerazioni che seguono.

È importante, in queste ricerche il fatto, che non occorre accelerare solamente n volte, ma che, se la massa iniziale è sufficientemente grande, si può accelerare quante volte si voglia $1/n$ della massa rimanente ciascuna volta. Questo $1/n$ può essere molto piccolo, quanto più piccola sia la massa rimanente, poichè, in teoria sino a certi limiti ed anche in pratica, si potrà sempre separarne una particella (sino alla suddivisione dell'atomo). Quindi k (numero delle suddivisioni) può diventare più grande di n. Questo ha grande importanza pel fatto che la " velocità di lancio ,, c può essere oltrepassata a volontà. Questa sia, per esempio, di 2000 m/sec. (corrispondente all'incirca alla velocità di efflusso di un buon gas di polvere), e ne venga lanciata sempre 1/100, allora dopo 560 suddivisioni si potrà avere la velocità di 11,2 km/sec. Infatti

$$V_x = \frac{560}{100} \cdot 2000 = 11200 \text{ m/sec.}$$

In seguito verrà mostrato quale aumento di velocità al secondo, ossia quale accelerazione, l'uomo possa sopportare senza dannose conseguenze. Si osserva intanto che l'aumento di velocità al secondo dipende dall'intervallo di tempo in cui si seguono i singoli lanci. Se si fissano f lanci di $1/n$ di massa al secondo, l'accelerazione b in questo intervallo diventa

$$b = \frac{f}{n} \cdot c$$

Il grado di accelerazione, come si vedrà più esattamente in seguito, nello azionamento a reazione, è sempre prescritto. In tal modo si ottiene, per il numero dei lanci

$$f = \frac{b}{c} \cdot n$$

Si vedrà, da quanto segue, che un uomo normale può sopportare senza conseguenze e per breve tempo, un'accelerazione di 30 m/sec. Ne risulta

$$f = \frac{b}{c} \cdot n = \frac{30}{2000} \cdot 100 = 1,5$$

Quindi per garantire all'uomo un volo sopportabile coll'apparato a reazione, possono farsi al secondo, per velocità di efflusso di 2000 m/sec. 1,5 lanci della massa residua. Questo sistema però significherebbe un lavoro a sbalzi dell'apparato a reazione, che sarebbe indispensabile impiegando singoli elementi di razzi a polvere. Si deve però assolutamente, per ragioni di resistenza della costruzione, e della resistenza fisica dell'uomo in voli di questo genere, ottenere un funzionamento continuato del motore a reazione. Le particelle lanciate (molecole di gas) devono effluire uniformemente ed allora verrà ottenuta la desiderata accelerazione.

La massa m che deve fluire al secondo, è

$$m = \frac{30}{2000} \cdot M \qquad \text{ossia,}$$

per ogni secondo, deve effluire 1/150 della massa residua. Si ricerca ora, nuovamente per questa suddivisione, il rapporto delle masse, poichè da questa condizione potrebbero sorgere le maggiori difficoltà per il problema del volo nello spazio; ma questa ipotesi non è giustificata. Intanto si constata che per il prossimo futuro non si può ancora pensare a viaggi nello spazio siderale, poichè il motore a reazione deve ancora venir sviluppato, ed a questo si riferiscono le considerazioni che seguono. Però la conoscenza di queste norme fondamentali è importantissima per la comprensione dell'intero problema, e per questa ragione si esamina più partitamente la possibilità di raggiungere l'estrema ed alta velocità finale di 11.200 m/sec. In principio il volo a reazione sarà limitato alle traiettorie collegate alla terra e cioè da continente a continente; si vedrà in seguito che ciò può avvenire sotto condizioni normali.

Si vuole ora esaminare dettagliatamente il fatto che il lancio di piccole particelle, come avviene nel motore a reazione descrittosi in seguito, è più favorevole per il consumo di massa, che non il lancio di parti di maggiori dimensioni (per esempio 1/2 M), come è stato indicato nel primo esempio.

Sia M la massa iniziale, e venga lanciata ogni volta la quantità $1/n$ della massa residua. Dopo la prima divisione si ha la massa

$$M_1 = M - \frac{1}{n} \cdot M = \frac{n-1}{n} \cdot M$$

dopo la seconda

$$M_2 = \frac{n-1}{n} \cdot M_1 = \left(\frac{n-1}{n}\right)^2 \cdot M$$

Dopo f lanci la massa residua sarà

$$M_f = \left(\frac{n-1}{n}\right)^f \cdot M$$

e la velocità raggiunta, dopo f lanci

$$v_f = \frac{f}{n} \cdot c$$

Le quantità c, n e v siano prescritte. Il numero dei lanci necessari è quindi

$$f = n \cdot \frac{v}{c}$$

La massa residua sarà

$$M_0 = \left(\frac{n-1}{n}\right)^{n \cdot \frac{v}{c}} \cdot M$$

Confrontando nuovamente colla suddivisione a metà $1/n = 1/2$ del primo esempio, e mettendo la condizione che la velocità v divenga uguale alla velocità di efflusso c, la massa residua è

$$M_0 = \left(\frac{2-1}{2}\right)^2 \cdot M = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot M = \frac{1}{4} M = 0{,}25 \cdot M$$

Se $1/n$ diventa più piccolo, per esempio $1/4$ si ha, se $v = c$

$$M_0 = \left(\frac{4-1}{4}\right)^4 \cdot M = \left(\frac{3}{4}\right)^4 \cdot M = 0{,}32 \cdot M$$

Per l'efflusso continuo, che è confrontabile col lancio di un numero infinito di piccole particelle, si ha:

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{\infty}$$

e quindi

$$M_0 = \left(\frac{\infty - 1}{\infty}\right) \cdot M.$$

L'espressione ha il valore

$$M_0 = \frac{1}{e} \cdot M = \frac{1}{2{,}72} \cdot M = 0{,}368 \cdot M$$

Questa formula esprime quanto segue: Se coll'efflusso o reazione continua si raggiunge la velocità di efflusso c, rimangono, della massa originaria, ancora 36,8 %, mentre con una suddivisione di $1/n = 1/2$ rimangono solamente 25 %.

Se invece deve essere raggiunta una velocità alta qualsiasi, quale sarà la massa residua? Sia

$$M_0 = \left(\frac{n - 1}{n}\right)^{n \cdot \frac{v}{c}} \cdot M.$$

Introducendo la relazione: $a^{x \cdot y} = (a^x)^y$ si può trasformare la formula in

$$M_0 = \left[\left(\frac{n - 1}{n}\right)^n\right]^{\frac{v}{c}} \cdot M$$

Per efflusso continuo si ha però $n = \infty$ e quindi

$$\left(\frac{n - 1}{n}\right)^n = \frac{1}{e}$$

dove e è la base dei logaritmi naturali, quindi

$$M_0 = \left(\frac{1}{e}\right)^{\frac{v}{c}} \cdot M = \frac{M}{e^{\frac{v}{c}}}$$

La massa residua è data praticamente dal cartoccio vuoto più il carico utile dell'apparecchio a reazione. Da questo si può determinare la massa iniziale necessaria per raggiungere una data velocità, presupponendo l'efflusso continuo. (Questa condizione, praticamente, si può realizzare meglio che non la combustione intermittente di singoli elementi di reazione, per assecondare il sistema di suddivisione). Ne risulta l'espressione fondamentale:

$$M = M_0 \cdot e^{\frac{v}{c}}$$

Se si introduce il rapporto di masse $\frac{m_{as}}{m_r}$ dove m_{as} è la massa intera iniziale e m_r quella del reattore vuoto, risulta, all'opposto, la velocità massima

$$V_{\text{mas}} = c \cdot 1\,n\left[1 - \left(\frac{m_{as}}{m_r}\right)\right]$$

Questa relazione fondamentale per il problema della reazione può essere anche ottenuta per derivazione della legge di impulso. L'equazione differenziale è $(m_r + m_a) \cdot dV = -c \cdot dm$ e l'integrazione

$$\int \frac{d V}{c} = - \int \frac{d_{ma}}{m_r + m_a} + C$$

m_a = massa del materiale propulsore non ancora uscito. Quindi

$$\frac{V}{c} = - \mathrm{l}\, n \, (m_r + m_a) + C$$

Sino alla prima esplosione $m_a = m_{aa}$ e $V = o$ quindi

$$C = + \mathrm{l}\, n \, (m_r + m_{aa})$$

e per un momento qualunque

$$V = c \cdot \mathrm{l}\, n \left(\frac{m_r + m_{aa}}{m_r + m_a} \right)$$

V_{mas} risulta per $m_a = 0$, e quindi alla fine del periodo di azionamento. Per il volo di un apparecchio a reazione dall'Europa all'America, si supponga che la velocità massima debba essere di $v = 2000$ m/sec. = 7200 km/ora. La velocità di efflusso dei gas sia 3000 m/sec. Come massa iniziale si ottiene

$$M = M_0 \cdot 2{,}72 \cdot \frac{2000}{3000} = M_0 \cdot 2{,}72^{0.665} = 2 \cdot M_0$$

La carica di materiale propulsore deve essere il doppio del peso a vuoto dell'apparecchio (per peso a vuoto si intende cartoccio + apparato propulsore + carico utile).

La forza propulsiva di un reattore aumenta tanto più:

1) quanto più alta è la velocità di efflusso o della miscela di carburante;

2) quanto maggiore è la massa iniziale in rapporto alla massa finale.

Come già indicato in un tempo futuro prossimo non si faranno viaggi nello spazio sidereo, e per i primi voli a grandissima distanza la proporzione delle masse non avrà una importanza decisiva.

Le considerazioni che seguono si riferiscono al funzionamento dei motori a reazione azionati con combustibili liquidi. Si rileva il loro vantaggio rispetto al razzo a polvere, e specialmente in relazione al requisito principale di grande velocità di efflusso.

3. *La reazione come principio motore di un'automobile o di velivolo.* – Le ricerche del prof. Goddard si riferivano esclusivamente alle possibilità di sviluppo di razzi a polvere. Accendendo la carica di polvere di un razzo, questa brucia sinchè non vi sia più carica. Un primo difetto si verifica pel fatto che non si è in grado di influenzare meccanicamente la combustione, ossia non si hanno possibilità di regolazione per variare la forza di propulsione. Invece questa è appunto una delle condizioni principali della moderna costruzione di motori.

In quanto alla potenzialità dei razzi a polvere, essa non viene in generale misurata in c. v. ma in kg. di reazione, poichè il principio si basa sulla *actio et reactio*. Per spingere il gas fuori del cilindro occorre una forza. Questa è rappresentata dalla pressione del gas, che si esprime in kg/cm². La forza di reazione risulta

dall'impeto con cui il cilindro rincula in senso contrario. Su un banco di prova si può impedire il rinculo, e misurare la forza di reazione mediante un dinamometro.

Come si rileva dalle illustrazioni dei razzi per salvataggio delle navi e per lo scioglimento della grandine, questi hanno un orificio di uscita per i gas che defluiscono. Mediante una adatta conformazione di quest'orificio si ha la possibilità di migliorare sensibilmente la velocità di efflusso. I razzi d'artificio attuali hanno, come collo dell'orificio, solo un piccolo restringimento, e la velocità di efflusso è di circa 400–600 m/sec. Dagli studi del prof. Goddard sui razzi a polvere con speciale considerazione delle caratteristiche dell'orificio, risultano le seguenti velocità di efflusso:

	Velocità di efflusso in m/sec.
Polvere semplice del razzo Coston-Ship	1600
Polvere da pistola N. 3, della Dupont Poxder Co. . .	2290
Polvere senza fumo "Infallible"	2434

Come orificio di efflusso più favorevole Goddard indica tubi lunghi, conici come per le turbine Laval. Però le velocità raggiunte sono piccole in confronto di quelle che si hanno coi dispositivi a reazione azionati da combustibili liquidi. Il lavoro non è semplice; per la compressione della polvere occorrono buone presse della portata di qualche tonnellata di pressione.

Tutti questi inconvenienti mostrano che il razzo a polvere non è adatto per una soluzione seria della propulsione a reazione. Si tende quindi alla costruzione di un motore a reazione che sia regolabile e sicuro, come col motore ad esplosione normale. Potendo regolare meccanicamente l'ammissione del combustibile si ha la possibilità di influenzare in larga misura la potenza, in tutte le posizioni. La *fig. 7* rappresenta schematicamente un motore simile. Si compone della camera di combustione, del cosiddetto fornello, a cui segue un tubo di uscita, per l'espansione dei gas. Da uno dei tubi di ammissione viene immesso il combustibile, per esempio, petrolio, spirito, benzina, alcole od idrogeno, e dall'altro tubo viene immesso l'ossigeno necessario per la combustione. L'accensione può essere elettrica. Come nell'attuale motore ad esplosione, anche qui il metodo di iniezione e polverizzazione dei combustibili ha molta influenza. Non possiamo, però, dilungarci qui sui vari fattori. Il tubo di uscita ha lo scopo di facilitare
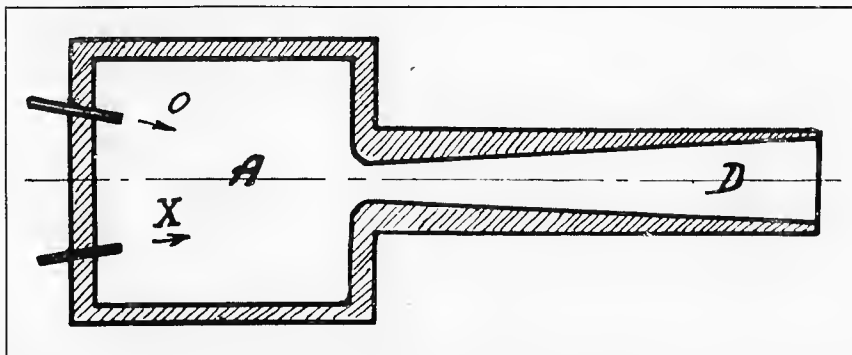
FIG 7 – IL PRINCIPIO DEL MOTORE A REAZIONE

la completa espansione dei gas che escono con forte velocità; questa ha importanza decisiva e rappresenta uno dei punti basilari del problema. Essa dipende dal rapporto delle pressioni, dal rapporto dei calori specifici, delle temperature assolute, come pure dalle costanti dei gas. Inoltre ha grande influenza anche la miscela del combustibile. In parte si hanno miscele differenti, coll'aria od il puro ossigeno, come nel normale motore a scoppio. Quanto più semplice è la costruzione del motore a reazione, tanto più complicati sono i fenomeni di combustione interna e di efflusso.

Ciò che interessa, oltre a questi fenomeni, è la questione del rendimento, che offre il migliore elemento per il giudizio sul nuovo motore. Ma uno studio accurato porta però ad una varia interpretazione di questo importante fattore economico. Il dott. ing. Sänger, in un suo libro, fa uno studio speciale sul rendimento.

Si ottiene il quadro migliore mettendo a confronto il motore a reazione col moderno motore ad esplosione. Analogamente a questo come per le parti di trasmissione sino all'elica, si può anche nel motore a reazione parlare di un " rendimento interno ". Questo dipende dalla incompletezza pratica dell'impianto e rappresenta il rapporto dell'energia ricavata dal motore all'energia termochimica dei combustibili impiegati. Il fatto che nel moderno motore a scoppio si abbia un rendimento interno che al massimo è del 30–35 % deriva dalle seguenti cause di errore:

	Energia del combustibile
1) Perdite chimiche per combustione incompleta in seguito a cattiva miscela e insufficienza di ossigeno	circa 5 %
2) Perdite di carburante in seguito a lavaggio con gas freschi	circa 5 %
3) Perdite dovute al tempo necessario per la combustione, che non è limitata al punto morto	circa 15 %
4) Perdite di calore attraverso le pareti	circa 15 %
5) Perdite per mancanza di tenuta dello stantuffo	circa 15 %
6) Perdite nel flusso, per tubazioni, mescolamento, pompe, ecc.	circa 5 %
7) Perdite per attrito	circa 15 %
8) Perdite nello scarico per incompleta dilatazione e raffreddamento dei gas	circa 30 %
Totale delle perdite . . .	circa 70 %

Ne risulta il noto fattore di rendimento dei motori ad esplosione $\gamma = 0{,}30$ a 0,35.

Per il motore a reazione si ottiene, in base alle ricerche sin qui eseguite, la tabella seguente:

La perdita 1) rimane all'incirca uguale.

Le perdite 2), 3), 4), 5), non si verificano, poichè il motore a reazione non ha stantuffi ed il calore che si trasmette alle pareti è utilizzato per il preriscaldamento del combustibile.

La perdita 6) è di circa il 3 %.

La perdita 7) si annulla anch'essa, a seconda della costruzione.

La perdita 8) rappresenta nel motore a reazione un fattore decisivo, come nel motore a scoppio. Qui si ha però la possibilità molto elevata di influenzare direttamente la combustione. La temperatura di espansione e finale è solo

una questione della lunghezza dell'ugello e può essere regolata in larga misura mediante questa. (Nei grandi modelli questa perdita è minore che nelle prove sinora eseguite con tipi piccoli). L'intera perdita 8, secondo le misure dell'Autore, può dirsi uguale a 10–15 %.

Altri fattori di perdita nel motore a reazione non vi sono, cosicchè si può calcolare la perdita totale del 18–23 % ed il rendimento medio γ di 0,8. Sänger definisce questo rendimento interno, nella forma più rappresentativa del quadrato del rapporto tra la velocità effettiva e quella teorica di scarico dei gas della combustione. Questo rapporto rappresenta quindi una cifra fissa di valutazione.

Il prof. Oberth ottiene per esempio con una parte di idrogeno e due di ossigeno, con un potere calorifico di $1{,}03 \cdot 10^6$ kgm/kg., una velocità di efflusso teorica di 4470 m/sec., e praticamente misurata di 4000 m/sec., ciò che corrisponde ad un rendimento, calcolato come sopra, di 80,03 %.

Differenti sono le condizioni per il cosiddetto rendimento esterno del motore a reazione in volo. Energie cinetiche e quindi potenze come si hanno nel volo effettivo, sono determinate dalle velocità raggiunte. Sänger fornisce anche a questo riguardo una rappresentazione efficace, assumendo come rendimento il rapporto della potenza di trasporto alla potenza del motore.

Nel volo a razzi questo fattore, a differenza che nel volo con motore a benzina, del velivolo normale, è molto variabile. Infatti in quest'ultimo si ha una velocità di crociera più o meno costante, ciò che non avviene affatto nel volo a razzi. Si può quindi in verità parlare solo di un rendimento momentaneo, che si riferisce all'assetto di volo che si osserva in quel dato momento.

Nelle zone più basse della velocità questo fattore è molto piccolo (2–4 % in confronto a circa 20 % degli apparecchi normali). Valori notevolmente migliori risultano per velocità ultrasonore nello spazio senza resistenza, dove ci si avvicina al 50 %. In quest'ultima cifra sono considerate anche le cattive condizioni dipendenti dall'ascensione attraverso la zona dell'atmosfera e le condizioni di accelerazione imposte da ragioni biologiche. Queste condizioni esterne dipendono in forte misura dal genere della traiettoria di salita di un simile apparecchio a reazione. Ne risulta anche che un volo a razzi nella zona dell'atmosfera non è conveniente, come non lo è la propulsione a razzo di un veicolo terrestre.

Ma anche queste considerazioni sulle condizioni di rendimento del razzo volante hanno la loro parte debole. Esse non tengono conto dei grandi percorsi di salita e di discesa, che in verità formano la più gran parte dell'intera traiettoria di volo. Ciò che in fondo sarà decisivo, è il grande risparmio di tempo e di combustibile per un volo simile. (Vedi nelle conclusioni maggiori dettagli in proposito).

Se attualmente non si è ancora molto progrediti nella soluzione di questo problema, ciò dipende specialmente dal fatto che, anzitutto sono state seguite vie alquanto difficili per la realizzazione del motore a reazione, e secondariamente che già nelle prime prove fondamentali risultano grandi difficoltà costruttive, specialmente in seguito alle alte temperature di combustione.

4. *I nuovi lavori di ricerca sul motore a reazione.* – Il prof. Oberth, nella sua pubblicazione: " Il razzo negli spazi planetari ,, ha per primo additato l' impiego di combustibili liquidi per il motore a reazione, e ha studiato il problema in
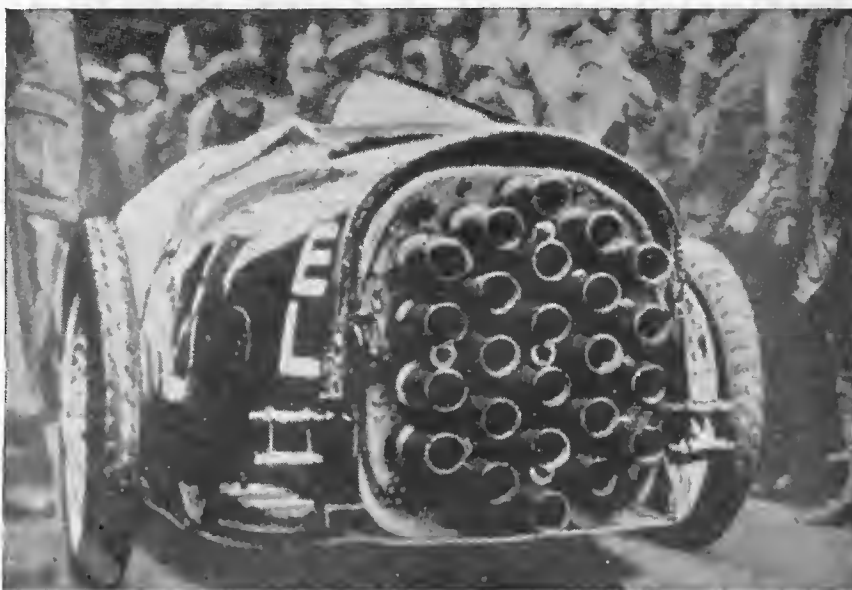
FIG. 8 – LA PARTE ANTERIORE DELL'AUTOMOBILE OPEL A RAZZO

modo strettamente scientifico. Spronato da questo precedente il grande propagandista del motore a reazione, l'austriaco ing. Max Valier, iniziò i suoi lavori. Nel 1928, in collaborazione col fabbricante di automobili Fritz von Opel, eseguì le prime esperienze con una vettura a razzi. La più grande vettura fabbricata da Opel (*fig. 8*) raggiunse il 23 maggio 1928 sulla pista dell'Avus presso Berlino la velocità di 236 km/ora, azionata da 24 razzi a polvere Sander di calibro 12 centimetri e lunghezza di 80 centimetri. Per impedire che la parte anteriore della vettura si sollevasse durante la marcia, data la sua leggerezza per la mancanza del motore a benzina, vennero applicate lateralmente piccole superfici portanti con posizione fortemente negativa.

Dopo questa vettura venne costruito un veicolo su rotaie, che però andò distrutto durante le prove in seguito alla forte velocità. Infine Opel tentò egli stesso un volo con propulsione a razzi applicata su aliante appositamente trasformato. Riuscì a percorrere un tratto di 1400 metri alla velocità di 140 km/ora, ma anche questo apparecchio venne distrutto durante le prove.

Poichè Opel trattava il problema principalmente come pubblicità per i suoi stabilimenti, Valier si separò e costruì una propria vettura sperimentale (*fig. 9*), nella quale impiegò per la prima volta elementi propulsori liquidi, mediante i quali potè raccogliere preziose esperienze, sviluppando sette diverse costruzioni. Lo scopo dei tentativi non era la costruzione di un'automobile a razzi, bensì lo sviluppo del motore. Dato che non poteva, in quel tempo, ottenere i mezzi necessari per le grandi costruzioni, si limitava a rendere attuale il problema, con questo mezzo. Ma poco tempo dopo perì in un incidente durante la presentazione della sua settima vettura, che era azionata da un motore ad ossigeno liquido e benzina.
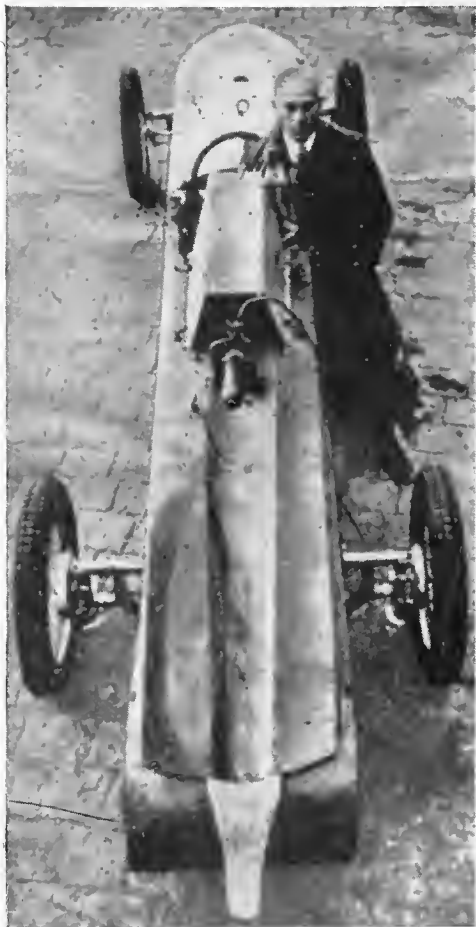
FIG. 9 – VETTURA SPERIMENTALE VALIER PER COMBUSTIBILI LIQUIDI

FIG. 10 – SILURO TILLING A POLVERE A RAZZO

Negli stessi anni (sino al 1933) l'ing. Tilling eseguì a Osnabrück alcune prove del cosiddetto siluro a razzi a polvere, le cui misure risultano dalla *fig. 10*. I razzi raggiunsero la quota di 6000 metri; l'atterraggio avveniva a mezzo di paracadute o di superfici portanti, che si aprivano automaticamente al raggiungimento della quota di tangenza. Durante l'ascesa il paracadute o le superfici portanti erano sistemate rientrate nei piani di stabilizzazione. Anche Tilling morì per incidenti durante le prove in laboratorio.

5. *I recenti esperimenti italiani.* – Nello scorso inverno sono giunte notizie sopra riusciti esperimenti italiani con un apparecchio a reazione. Non si tratta di un velivolo capace di salire ad altezze indefinite, ma di un velivolo ancora in completa dipendenza dall'aria circostante. Però la propulsione avviene per opera di reazione, e viene denominata propulsione a getto di aria calda. L'ossigeno necessario alla combustione del carburante (benzina) viene ricavato

dall'aria ambiente. Questo principio, ha naturalmente il vantaggio che può essere trasportata una notevole maggior quantità di combustibile. Lo schema dell'apparato risulta dalla *fig. 11*. La costruzione dell'ing. Campini risale al 1932, nella quale epoca ottenne il relativo brevetto (*fig. 12*). Il vento di volo viene assorbito da imbuti (3) disposti attorno alla prua dell'apparecchio; l'aria giunge in un compressore centrifugo (4) azionato da un motore o da una turbina a gas (10). Dopo il compressore l'aria passa in un raddrizzatore, che funziona anche da radiatore, e giunge finalmente nella camera di combustione (5). Qui, in un canale anulare (tubo Venturi) viene mescolata col carburante provocando la combustione. L'efflusso avviene attraverso un ugello di espansione come negli altri apparati a reazione.

L'apparecchio, costruito dagli stabilimenti Caproni, ha l'aspetto rappresentato nella *fig. 12*, nella quale però viene impiegata per l'involo un'elica normale. [1] Il motore durante il volo aziona il compressore per la pressione e il riscaldamento dell'aria aspirata. Secondo le notizie, l'apparecchio, guidato dal colonnello De Bernardi avrebbe eseguito un volo di 10 minuti raggiungendo la velocità di 710 chilometri orari. [2]

6. *Esperimenti dell'Autore*. – Questi hanno avuto lo scopo di sviluppare il motore per combustibili liquidi. Perciò venne creato un banco di prova (*fig. 13*) sul quale venne eseguita nel 1936 la prima serie di esperienze. Come camera di combustione servirono i cilindri di un motore d'automobile Mercedes a due cilindri, che vennero modificati in modo che gli organi di ammissione e gli ugelli di espansione potessero essere applicati secondo i requisiti. Su questo motore vennero fatte le ricerche seguenti:

1) misura della forza di reazione;
2) misura della velocità di efflusso dei gas della combustione;
3) condizioni termiche;
4) iniezione e polverizzazione del combustibile;
5) miscele di combustibile;
6) forme diverse degli ugelli di espansione.

La forza di reazione ha potuto esser misurata in modo semplice, montando l'intero motore, comprese le bottiglie del combustibile sotto pressione ed i serbatoi, sopra un carrello con supporti a rulli, accoppiato con un dinamometro fissato ad una parte fissa del banco. Al principio si ebbero grandi difficoltà in causa delle alte temperature, che causarono la fusione ripetuta degli ugelli e degli elementi di iniezione. Il raffreddamento avveniva in massima a mezzo della camicia esterna del cilindro, e per ottenerlo si usufruiva degli stessi combustibili; solo in alcuni casi si impiegò l'acqua.

Si fecero le prove coi combustibili seguenti: miscela di benzina ed aria; benzina ed ossigeno; alcole ed ossigeno; acetilene ed ossigeno; idrogeno ed ossigeno. Questi, ad eccezione dell'acetilene e dell'idrogeno, vennero tutti iniettati allo stato liquido. Nella maggior parte dei casi anche l'ossigeno venne iniettato.

Tutte le prove richiesero molto tempo, poichè i mezzi disponibili erano scarsi e primitivi. Parallelamente ad esse vennero eseguite le prime prove con

[1] È noto che il tipo attualmente realizzato non ha bisogno di tale ripiego (*N. n. D.*).

[2] Inoltre ha volato da Milano a Roma (*N. d. D.*).
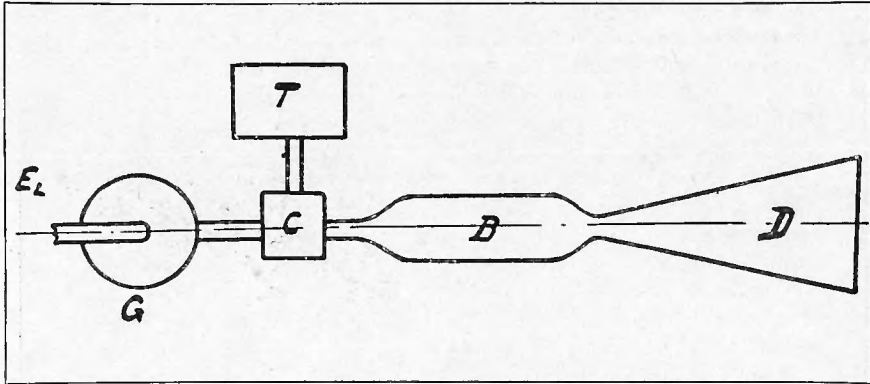
FIG. 11 – PRINCIPIO DELLA PROPULSIONE AD ARIA CALDA
G) compressore; *T*) serbatoio di combustibile; *C*) camera di miscela e gasificazione; *B*) camera di combustione; *D*) tubo d'espansione.
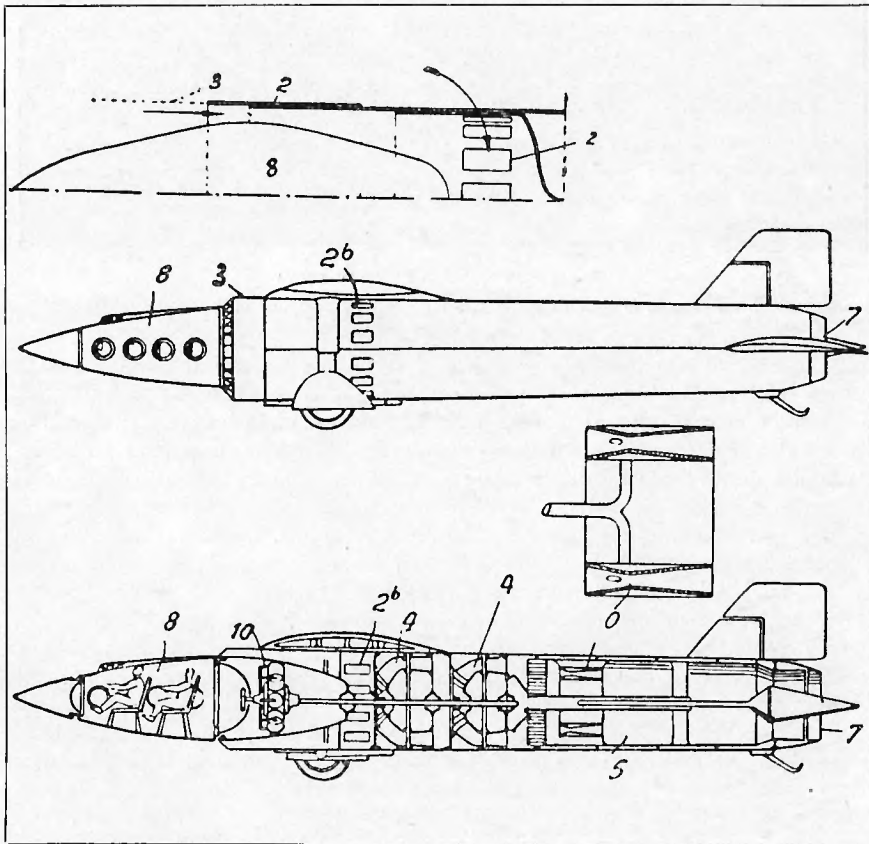
FIG. 12 – L'APPARECCHIO A REAZIONE AD ARIA CALDA CAMPINI, COSTRUITO NEGLI STABILIMENTI CAPRONI
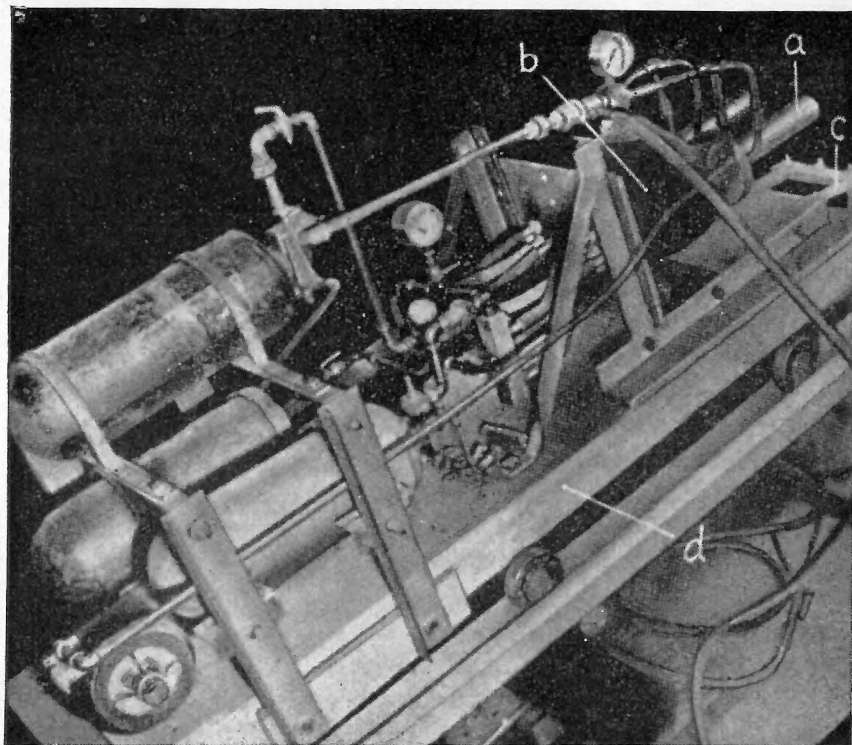
FIG. 13 – MOTORE PER BANCO DI PROVA

a) ugelli di espansione; *b*) cilindro per la combustione; *c*) dinamometro; *d*) carrello scorrevole.

un modello di apparecchio costruito in base alle esperienze acquisite. Gli ultimi voli ebbero luogo sul Katzensee presso Zurigo, ottenendo una velocità massima di 193 km/ora. Il modello era comandato a distanza (*fig. 14*). I voli di prova dovevano servire, non per raggiungere alte quote, bensì per voli orizzontali a quota massima di circa 50 metri. In seguito ad errore di comando vi fu un atterraggio con rottura dell'antenna nel pantano della riva, mentre vi furono due ammaraggi sull'acqua senza inconvenienti. In questo modello non si ebbe grande cura della forma aerodinamica.

Il modello attualmente in costruzione, con apertura alare di m. 4,80 previsto anche per ammaraggio sull'acqua, avrà migliori caratteristiche di volo, e servirà per scopi dimostrativi. Erano progettati tre piccoli motori a reazione, di cui i due esterni, collocati nelle fusoliere laterali, dovevano servire alle manovre. Però l'esperienza negli ultimi voli col modello precedente ha dimostrato che ciò avrebbe dato luogo a difficoltà, per cui vi si è rinunciato, ricorrendo ai sistemi normali di comando. Il motore a reazione viene montato nella fusoliera centrale. Nei due galleggianti vi sono i serbatoi di combustibile ed ossigeno; nella parte mediana dell'ala gli organi di comando (*fig. 15*). Come sviluppo ulteriore è progettata una cosiddetta racchetta a distanza che dovrebbe volare alla distanza di 100 a 150 chilometri.
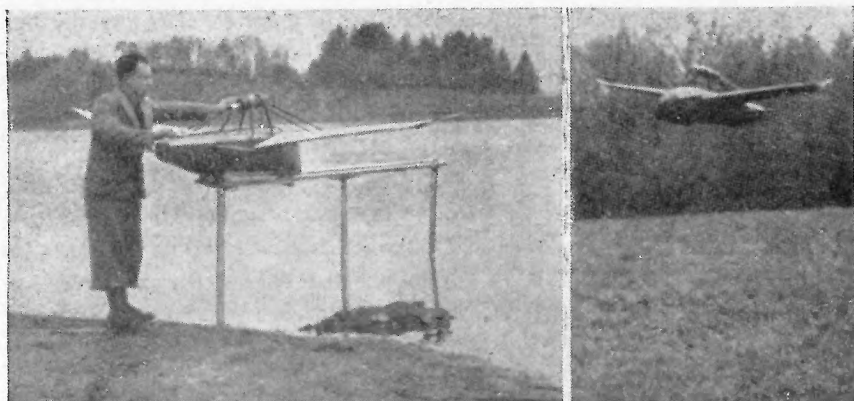
FIG. 14 – PREPARATIVI DI INVOLO

7. *Conclusioni.* – Seguendo le considerazioni sui rapporti di massa, si deve constatare che il consumo di combustibile per questo motore è molto elevato, cosicchè, montato su un aeroplano, detto motore non potrebbe funzionare per molte ore (il primo modello di volo consumava 38 grammi al secondo). Però, data la grande potenzialità, è decisiva la velocità finale raggiungibile in questo tempo. Il volo di un simile apparecchio è differente da quello del velivolo normale. Sino dall'involo si deve porre attenzione al fatto che l'accelerazione (aumento della velocità nell'unità di tempo) non diventi troppo grande, poichè è questa, e non la velocità, che è dannosa per l'uomo. I gas combusti defluiscono ad una velocità di 3–5 km/sec., e con tale velocità volerà l'apparecchio. Però
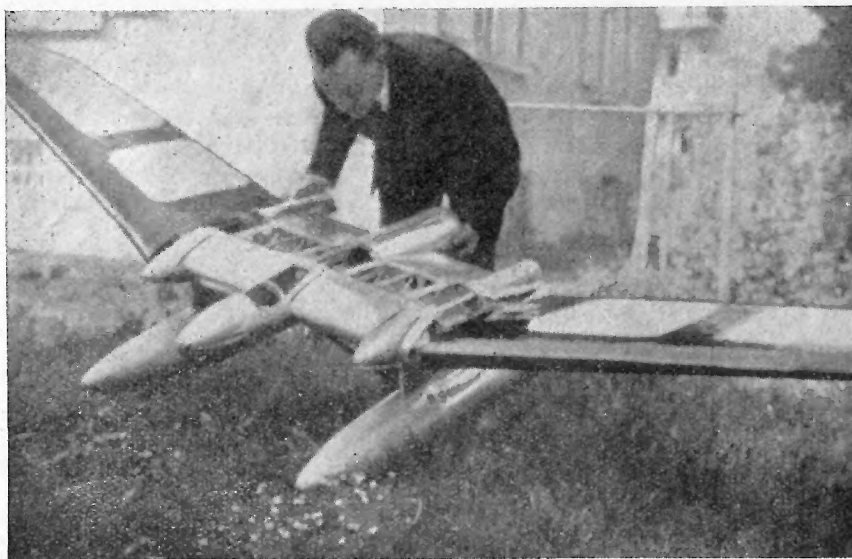
FIG. 15 – MODELLO SPERIMENTALE DI M. 4,8 D'APERTURA ALARE, MUNITO DI MOTORE A REAZIONE PER COMBUSTIBILI LIQUIDI

col motore a reazione a liquido si è in condizioni di poter regolare l'ammissione del combustibile e quindi di mantenere l'accelerazione entro limiti sopportabili. L'uomo normale può sopportare bene un'accelerazione di 30 m/sec. ossia l'apparecchio dovrà percorrere nel primo secondo 30 metri, nel secondo 60, nel terzo 90 metri. Dopo un minuto si ottiene quindi la velocità di 1800 m/sec. = 6480 km/ora.

Se si vuol volare su un lungo percorso, per es. dall'Europa all'America, non occorre che il motore funzioni durante l'intero volo, ma solo per breve tempo. L'involo può esser paragonato ad un colpo d'arma da fuoco od un lancio di sasso; in quest'ultimo la forza muscolare rappresenta il motore, che agisce solo su un breve tratto; ma la grande velocità finale trasmessa al sasso, nel momento in cui abbandona la mano, lo trasporta a grande distanza. Nel tiro si ha la velocità massima allorchè il proiettile abbandona la canna. L'accelerazione è però tanto elevata che l'uomo non potrebbe tollerarla.

Dopo due a cinque minuti l'apparecchio provvisto di motore a reazione acquista una grande velocità. Nel momento in cui il motore è fermato, viene anche raggiunta la velocità massima. La traiettoria sale all'inizio molto rapidamente; dopo fermato il motore la velocità, per l'azione della gravità terrestre diminuisce costantemente, ed in principio anche in causa della resistenza dell'aria; la traiettoria in conseguenza si appiattisce. La velocità raggiunta è però sufficiente a portare l'apparecchio a grande altezza, per esempio a 500 sino a 1000 chilometri, mentre il motore deve lavorare solo fino alla quota di 50 a 100 chilometri. Quando l'apparecchio ha raggiunto la quota di tangenza, inizia il volo librato. (Questa espressione però non è esatta, poichè la traiettoria si mantiene in seguito all'energia cinetica). Il percorso non sarà ripido, cosicchè nel punto culminante non si avrà la velocità uguale a zero. L'effettivo volo librato si inizia solo all'entrata negli alti strati dell'atmosfera, a circa 100 chilometri di altezza.

Eseguendo il calcolo del tempo per un simile volo, si ottiene che per trasvolare la distanza dall'Europa all'America sono necessari solo da 30 minuti a due ore (a seconda dell'accelerazione scelta).

L'A. si riserva di sviluppare in un successivo articolo lo studio di tale volo, che presenta le note difficoltà, data la velocità ipersonora.